

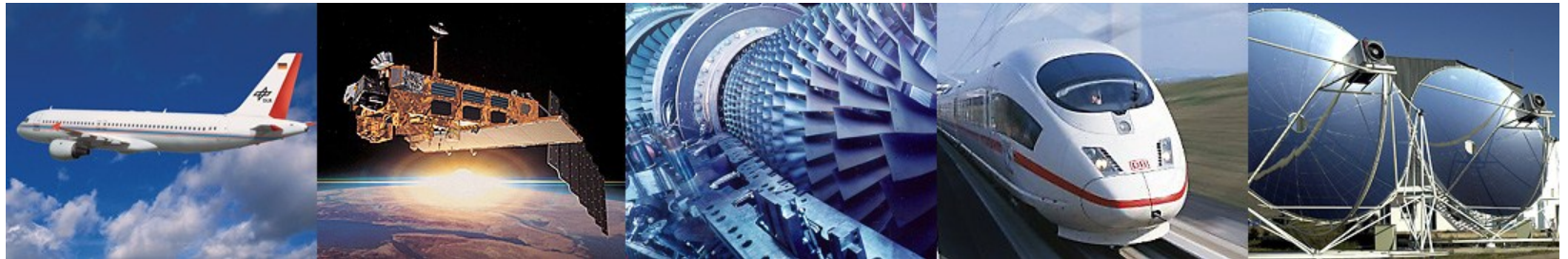
Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Wissen für Morgen



Das DLR

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt



- Forschungseinrichtung
- Raumfahrt-Agentur
- Projektträger

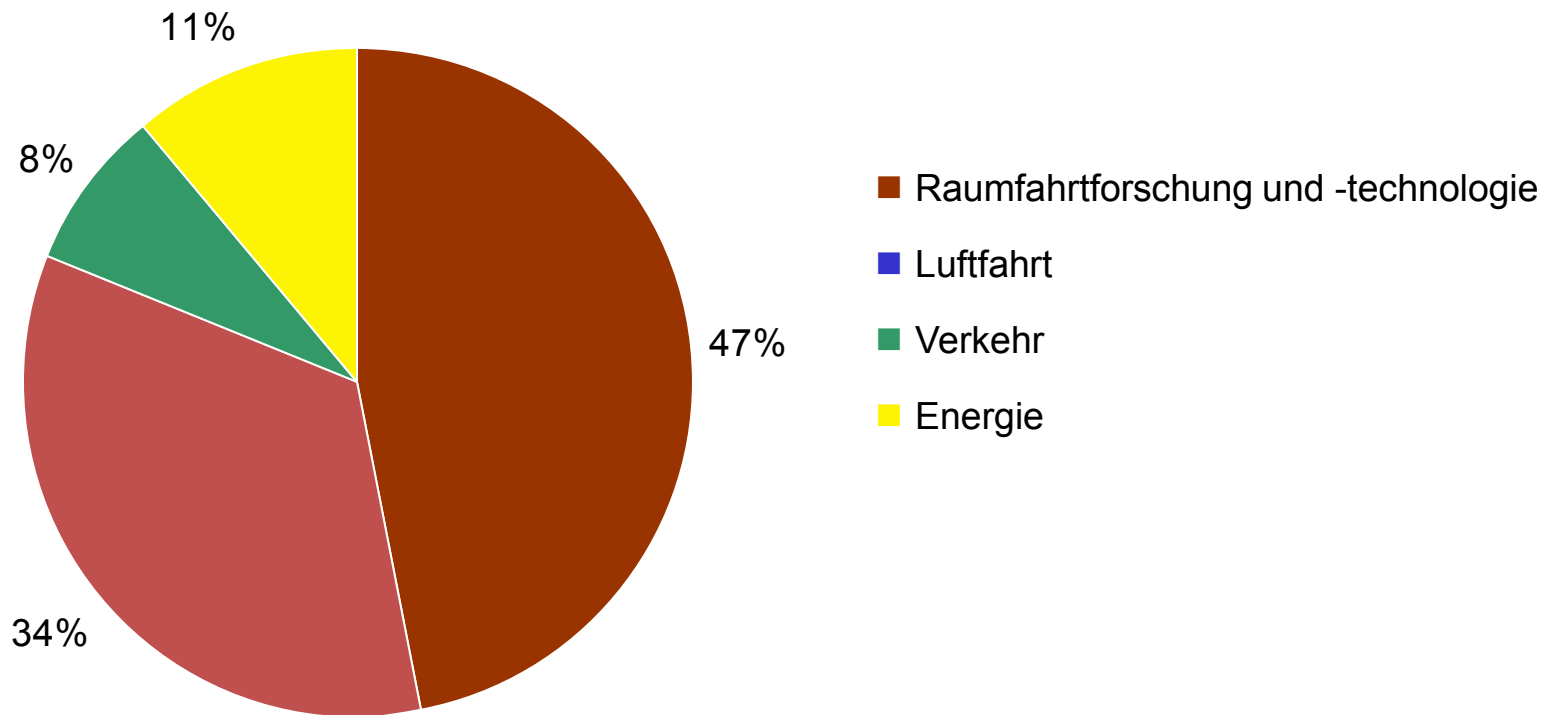


Forschungsbereiche

- Luftfahrt
- Raumfahrtforschung und -technologie
- Verkehr
- Energie
- Raumfahrtmanagement
- Projektträger



Prozentualer Anteil der Geschäftsfelder an den Gesamterträgen Forschung und Entwicklung 2011



Standorte und Personal

Circa 7.000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter arbeiten in 32 Instituten und Einrichtungen in
■ 16 Standorten.

Büros in Brüssel,
Paris und Washington.



DLR Standort Köln

Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter: 1400

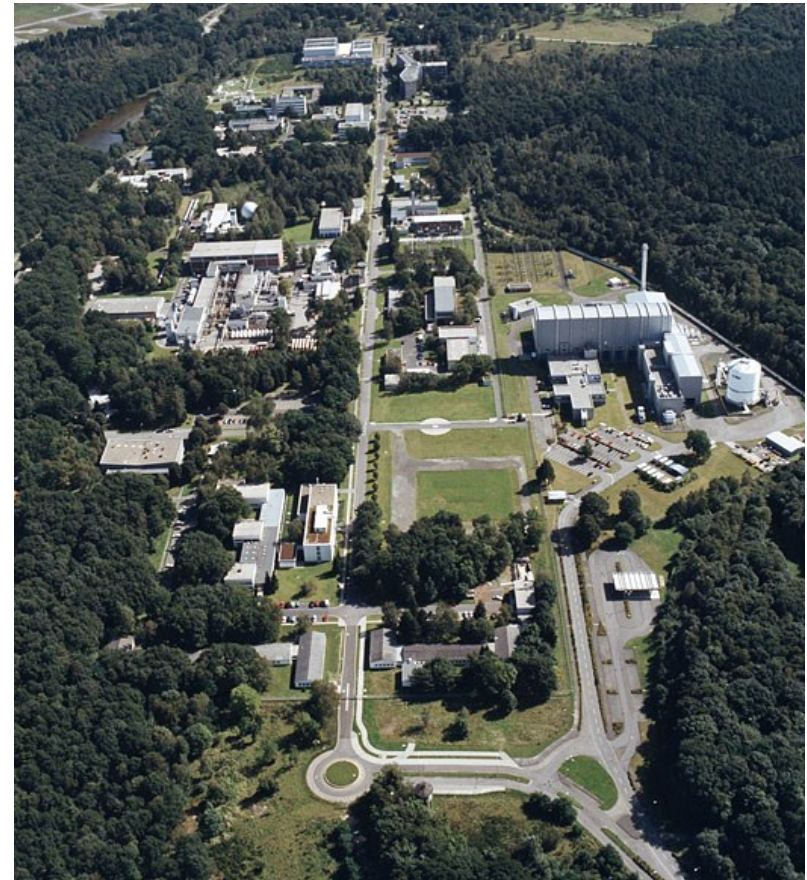
Fläche: 550.000 m²

Forschungsinstitute und Einrichtungen:

- Institut für Materialphysik im Weltraum
- Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin
- Institut für Antriebstechnik
- Institut für Werkstoff-Forschung
- Institut für Flughafenwesen
- Institut für Solarforschung
- Institut für Technische Thermodynamik
- Hochflusssdichte-Sonnenofen
- Simulations- und Softwaretechnik
- Qualitäts- und Produktsicherung
- European Astronaut Center
- Überschall- und Hyperschalltechnologie
- Europäischer Transschall Windkanal
- Nutzerzentrum für Weltraumexperimente MUSC
- Projektträger im DLR



[<< zurück](#)



Aerogele in der Gießerei

Dr. Barbara Milow

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)

Institut für Materialphysik im Weltraum

51147 Köln

Email: Barbara.Milow@dlr.de



Wissen für Morgen



Übersicht

1. Aerogele allgemein

Was sind Aerogele?

Wie werden Aerogele hergestellt?

Welche Eigenschaften haben Aerogele?

2. Aerogele in der Gießerei

Wo können Aerogele eingesetzt werden?

Welche Eigenschaften sind essentiell?

Einsatz in der Gießerei

Kernsandbinder - **AeroSande**

Kernsandadditive - **AeroAdditive**

3. Nanotomographie



Übersicht

1. Aerogele allgemein

Was sind Aerogele?

Wie werden Aerogele hergestellt?

Welche Eigenschaften haben Aerogele?

2. Aerogele in der Gießerei

Wo können Aerogele eingesetzt werden?

Welche Eigenschaften sind essentiell?

Einsatz in der Gießerei

Kernsandbinder - **AeroSande**

Kernsandadditive - **AeroAdditive**

3. Nanotomographie



Was sind Aerogele?

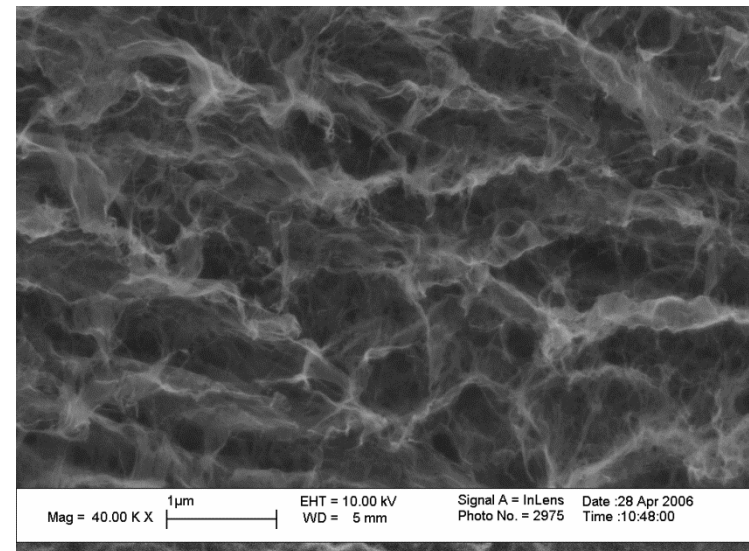
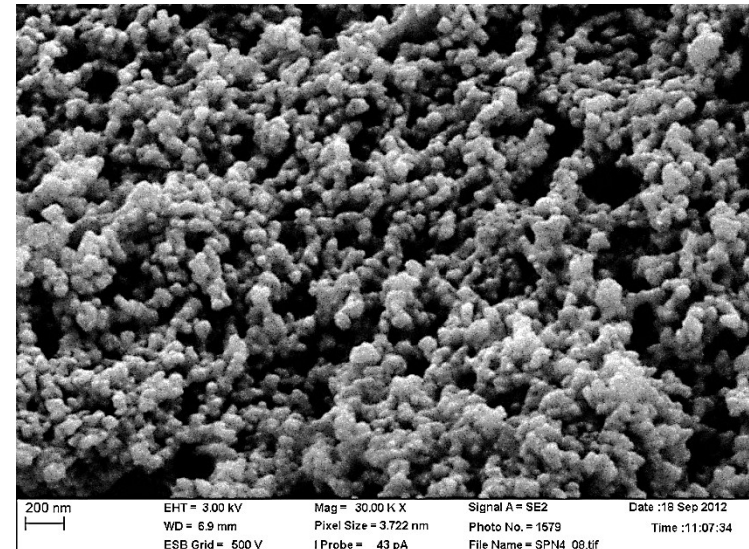
Aerogele sind

- offenporige,
- nanostrukturierte,
- Festkörper

die über Sol-Gel Technologie gewonnen werden

Aerogeltypen

- Oxide (Quarz, Titanoxid, Zirkonoxid,...)
- Carbonate, Phosphate
- Biopolymere (Cellulose, Chitin,...)
- Polymere (Bakelit®,...)
- Reiner Kohlenstoff aus Polymeren und Biopolymeren



Übersicht

1. Aerogele allgemein

Was sind Aerogele?

Wie werden Aerogele hergestellt?

Welche Eigenschaften haben Aerogele?

2. Aerogele in der Gießerei

Wo können Aerogele eingesetzt werden?

Welche Eigenschaften sind essentiell?

Einsatz in der Gießerei

Kernsandbinder - **AeroSande**

Kernsandadditive - **AeroAdditive**

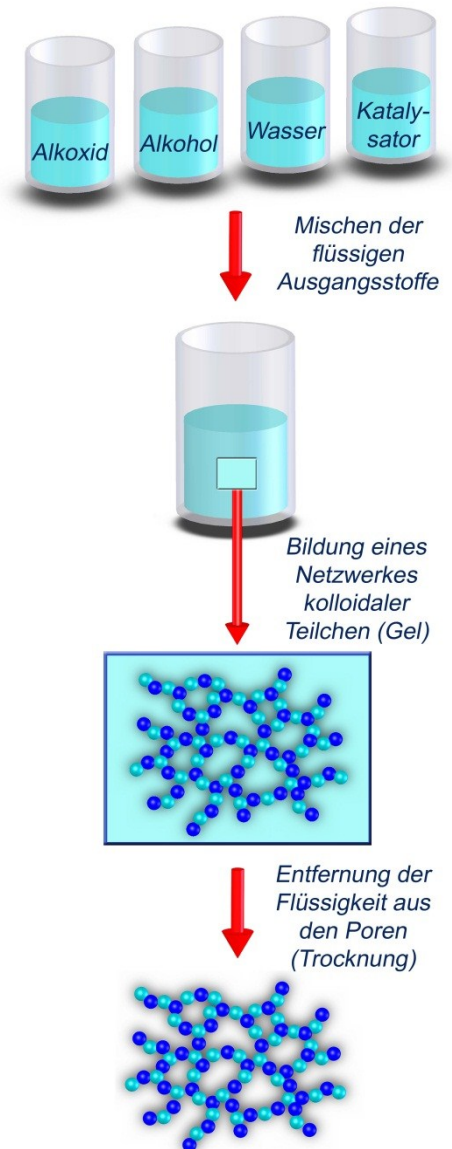
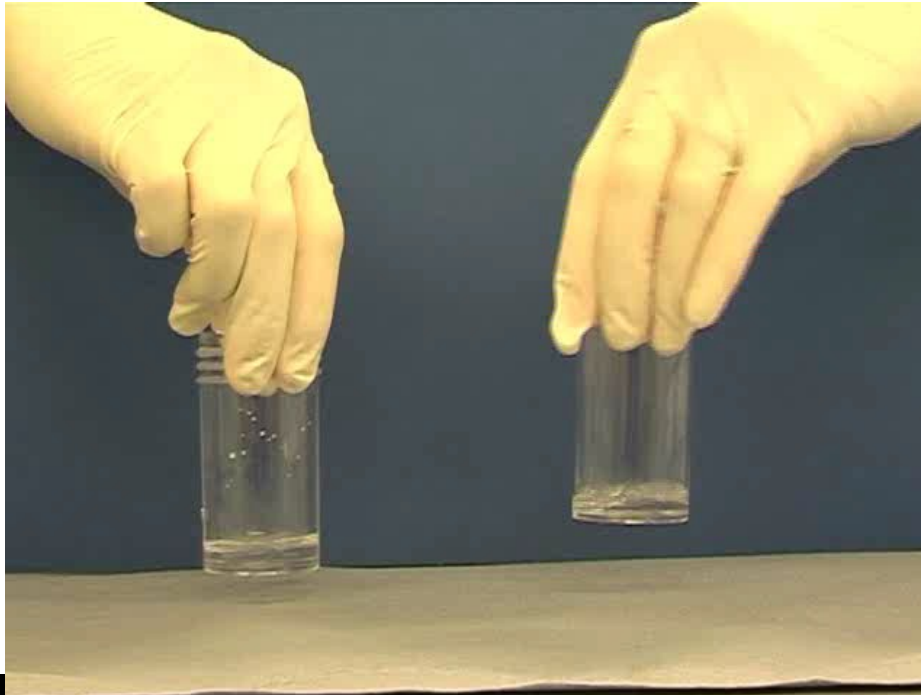
3. Nanotomographie



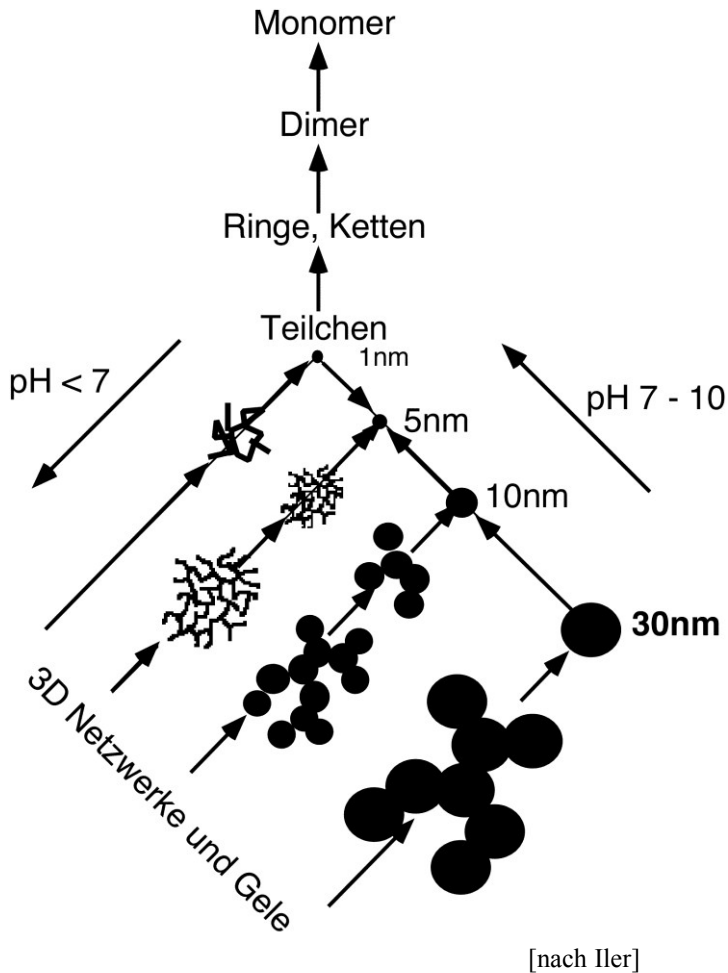
Herstellung von Aerogelen

Sol-Gel-Prozess

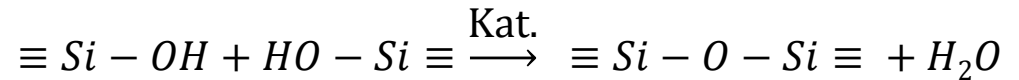
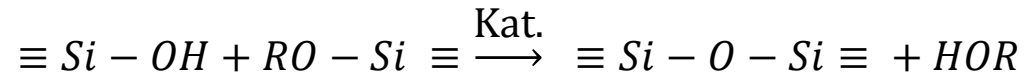
- Mischen von Chemikalien
- Gelieren lassen
- Trocknen



Herstellung von anorganischen Aerogelen



Kondensationsreaktionen:



mit R: $-CH_3, -C_2H_5, \dots$

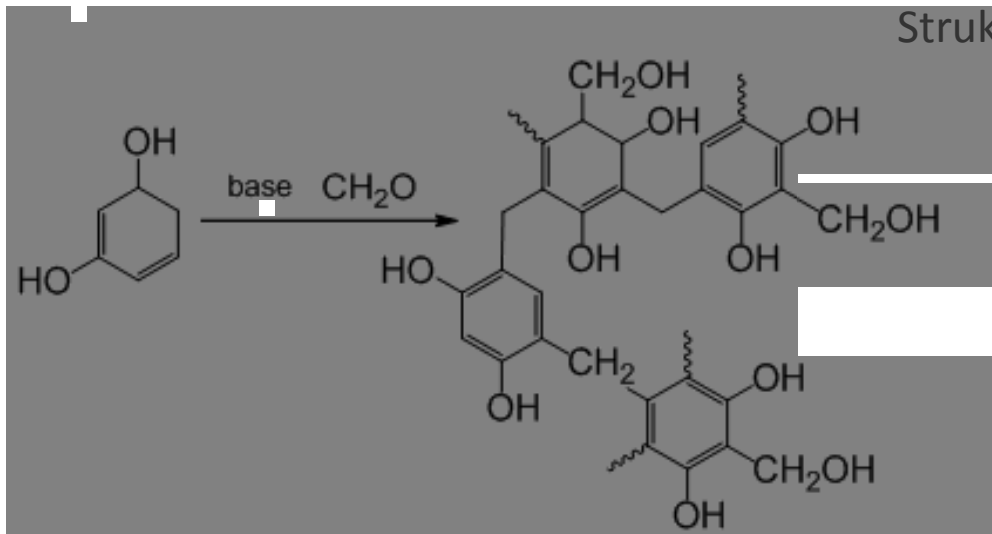
Struktur des Netzwerks wird bestimmt durch:

- pH-Wert
- Konzentration des Katalysators
- Molverhältnis Wasser:Alkoxyd
- Temperatur



Herstellung von organischen Aerogelen

Polykondensation **nach Pekala (1989)** von Resorcin und Formaldehyd in wässriger Lösung **Katalysator** (z.B. Na_2CO_3):



- pH-Wert
- Katalysator
basisch oder sauer
 $R/C = 50$ bis 1500
- Molverhältnis Resorcin:Formaldehyd
 $1:2$ bis $1:1,3$
- Temperatur

Aus dem Diphenol werden durch Polykondensation Ketten und Ringe und schließlich Teilchen gebildet: Kolloidale Lösung, in der die Teilchen aggregieren, vernetzen und gelieren.



Trocknung - hier entscheidet sich alles!

Methoden: an Luft Gefriertrocknung überkritische Trocknung

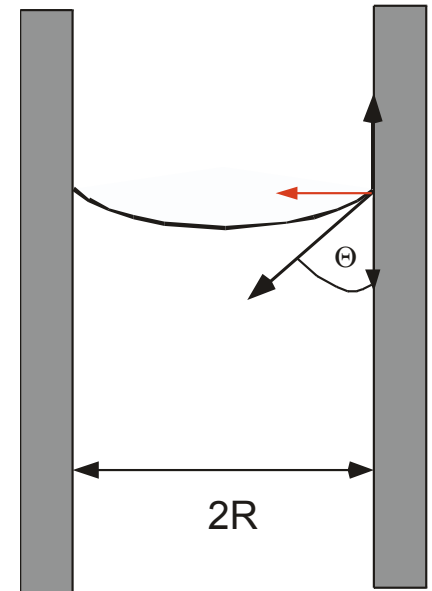
Lufttrocknung führt zu **Xerogelen**

Im allgemeinen mit starker Schrumpfung verbunden

- Das feine Porensystem wird durch Kapillarkräfte zerstört
- Porosität zwischen 5 - 50% des massiven Materials

Aber:

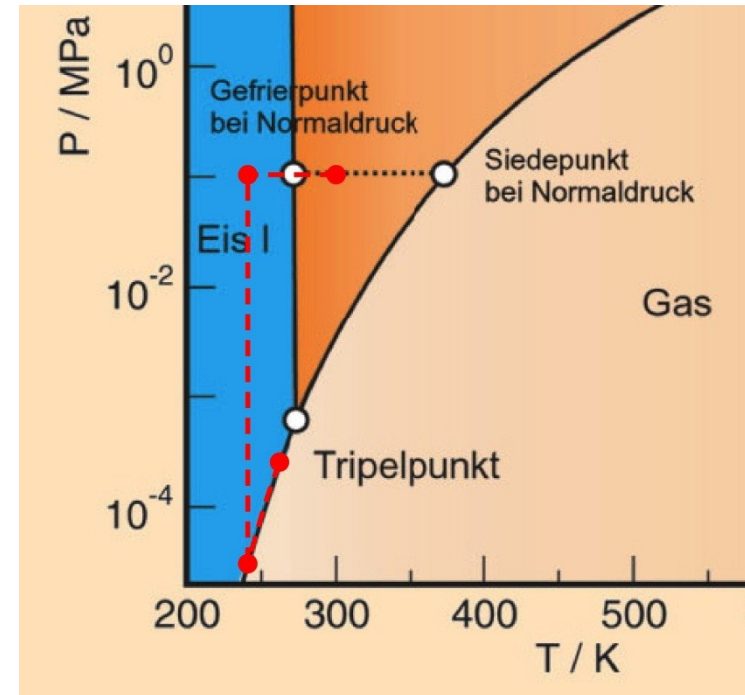
Lufttrocknung kann trotz starker Schrumpfung so gesteuert werden, dass perfekte Xerogele entstehen!



Trocknung - hier entscheidet sich alles!

Methoden: an Luft Gefriertrocknung überkritische Trocknung

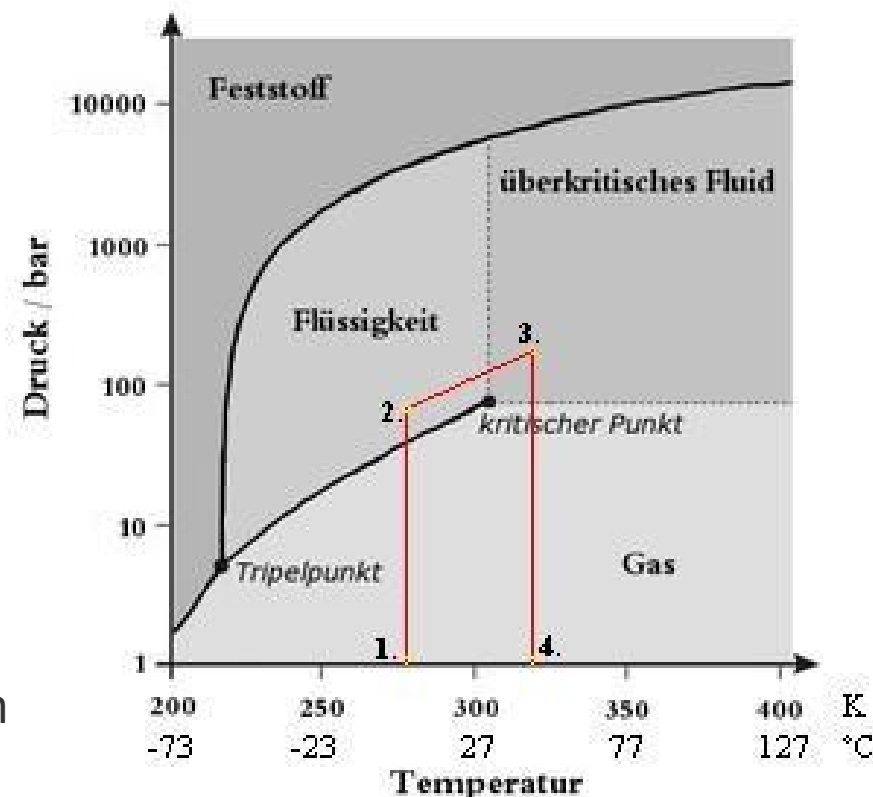
1. Nasse Gele werden mit Flüssigstickstoff schockgefroren
2. Platzieren auf temperierter Stellfläche (-55°C)
3. Evakuierung
4. Sublimation entlang der Sublimationslinie durch
 - Druckanpassung
 - Temperaturerhöhung der Stellfläche
5. Probenkammer belüften



Trocknung - hier entscheidet sich alles!

Methoden: an Luft Gefriertrocknung überkritische Trocknung

1. Nasse Gele in einer Wanne mit Ethanol im Autoklaven platzieren
2. Austausch des Ethanols gegen flüssiges Kohlendioxid
3. Temperaturerhöhung über den kritischen Punkt = Ununterscheidbarkeit von Gas und Flüssigkeit = keine Menisken
4. Kritischer Punkt von CO_2 :
 1. $T_C = 31,1^\circ\text{C}$, $p_C = 75 \text{ bar}$
5. Prozessführung:
 1. $T = 40^\circ\text{C}$, $p = 90 \text{ bar}$
6. Ablassen des gasförmigen CO_2 auf Normaldruck (sehr langsam (!): Diffusion im Porennetzwerk)



Übersicht

1. Aerogele allgemein

Was sind Aerogele?

Wie werden Aerogele hergestellt?

Welche Eigenschaften haben Aerogele?

2. Aerogele in der Gießerei

Wo können Aerogele eingesetzt werden?

Welche Eigenschaften sind essentiell?

Einsatz in der Gießerei

Kernsandbinder - **AeroSande**

Kernsandadditive - **AeroAdditive**

3. Nanotomographie



Eigenschaften von Aerogelen

Geringe Dichte - hohe Porosität

90 - 99,9 % Porosität

Hohe Schallabsorption - gering Schallgeschwindigkeit

Dämpfung > 50 dB, $v_{\text{schall}} \approx 100 \text{ m/s}$

Geringe Wärmeleitfähigkeit

5 - 300 mW/mK

Keine Reaktion/Benetzung mit Metallschmelzen bis 950°C

Transparent oder opak

variabler Brechungsindex (1,001 bis 2,1)

Große innere Oberfläche

10 - 2000 m²/g

Funktionalisierbare Grenzflächen

Chemisch - z.B. hydrophob

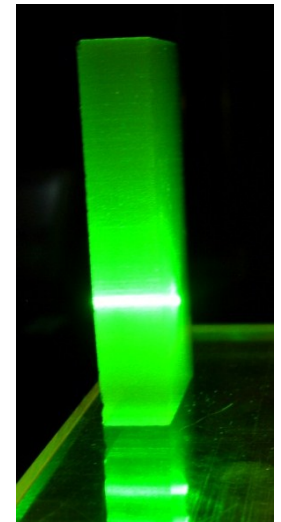
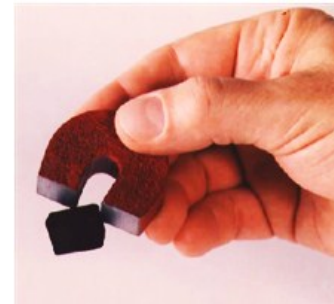
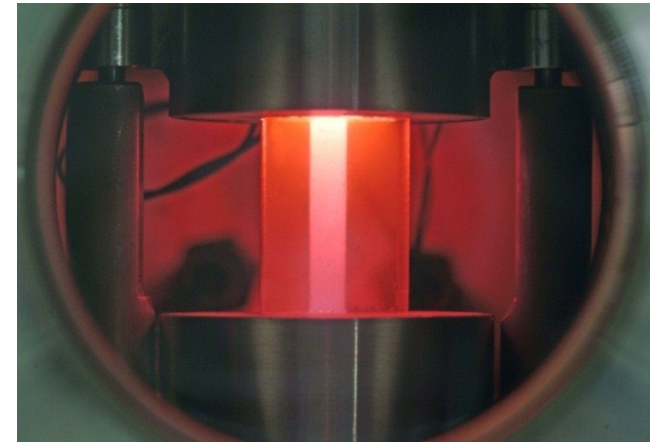
Physikalisch - z.B. magnetische Schichten

Funktionalisierbare Gelkörper

Einbau von Teilchen mit besonderen Eigenschaften

Verbund- oder Hybridgele

Gele aus besonderen Materialien (z.B. Ferroelektrika)





Kohlenstoff-Aerogel

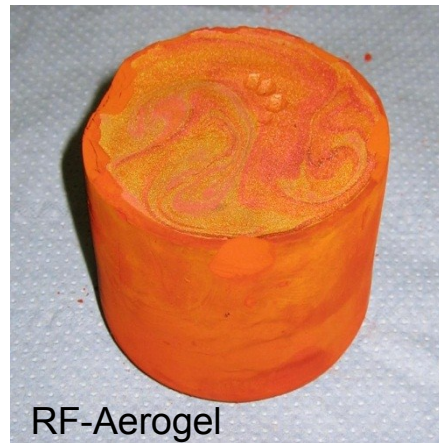
Aussehen und Struktur



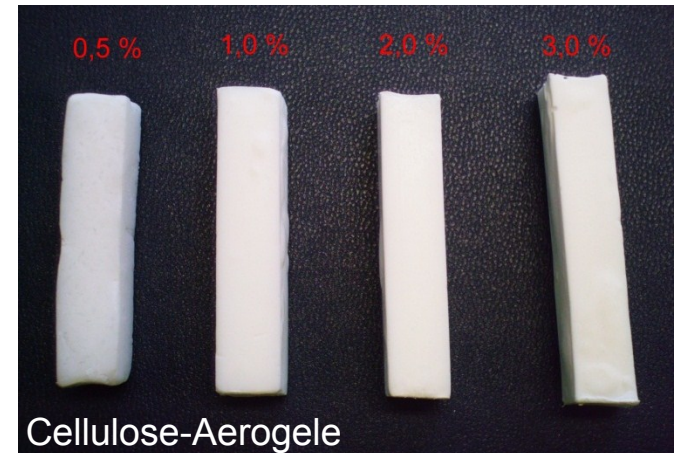
V_2O_5



TiO_2



RF-Aerogel



Cellulose-Aerogele



Flexible Silika-Aerogele



Übersicht

1. Aerogele allgemein

Was sind Aerogele?

Wie werden Aerogele hergestellt?

Welche Eigenschaften haben Aerogele?

2. Aerogele in der Gießerei

Wo können Aerogele eingesetzt werden?

Welche Eigenschaften sind essentiell?

Einsatz in der Gießerei

Kernsandbinder - **AeroSande**

Kernsandadditive - **AeroAdditive**

3. Nanotomographie



Anwendungsfelder

Tiegelmaterial

Einsatz für wissenschaftliche Untersuchungen

Erstarrungsforschung

Visuelle Beobachtung des Abguss

Formfüllung und Fließverhalten der Metallschmelze

Kernsand-Binder **AeroSande**

Filigrane Kerne und Kerne mit anspruchsvollen Geometrien

Dünnwandiger Guss

Kernsand-Additive **AeroAdditive**

Universell einsetzbar

Hochtemperatur Verbundwerkstoffe AeroComposites

Thermische Isolation



Übersicht

1. Aerogele allgemein

Was sind Aerogele?

Wie werden Aerogele hergestellt?

Welche Eigenschaften haben Aerogele?

2. Aerogele in der Gießerei

Wo können Aerogele eingesetzt werden?

Welche Eigenschaften sind essentiell?

Einsatz in der Gießerei

Kernsandbinder - **AeroSande**

Kernsandadditive - **AeroAdditive**

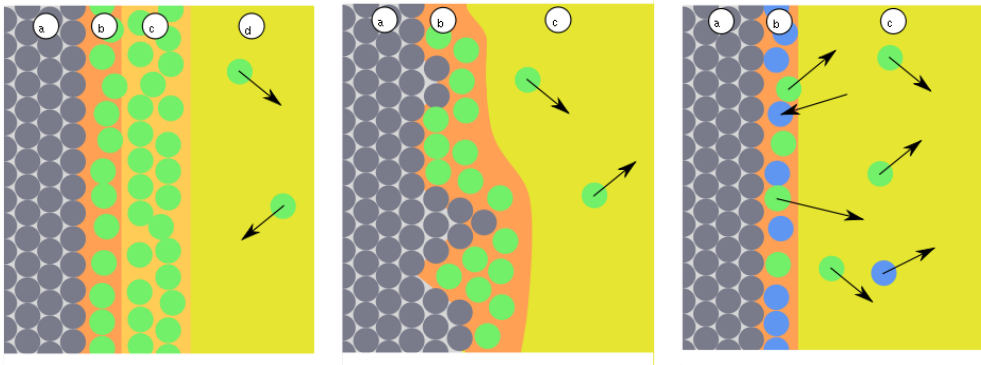
3. Nanotomographie



Eigenschaften

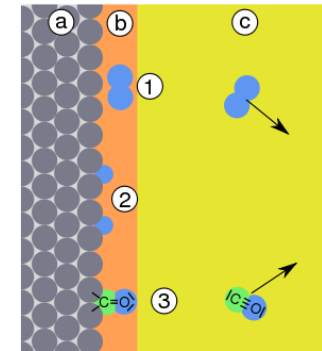
Physisorption

- BET-Isotherme
 - Innere Oberflächen
10 - 2000 m²/g
 - Porendurchmesser
2 - 25 nm



Chemisorption

- Thermogravimetrische Analysen (TGA)
 - C-Aerogel: ohne Einfluss
 - Silikate-Aerogel: - 2,5%
 - Organisches Aerogel: -3,3%

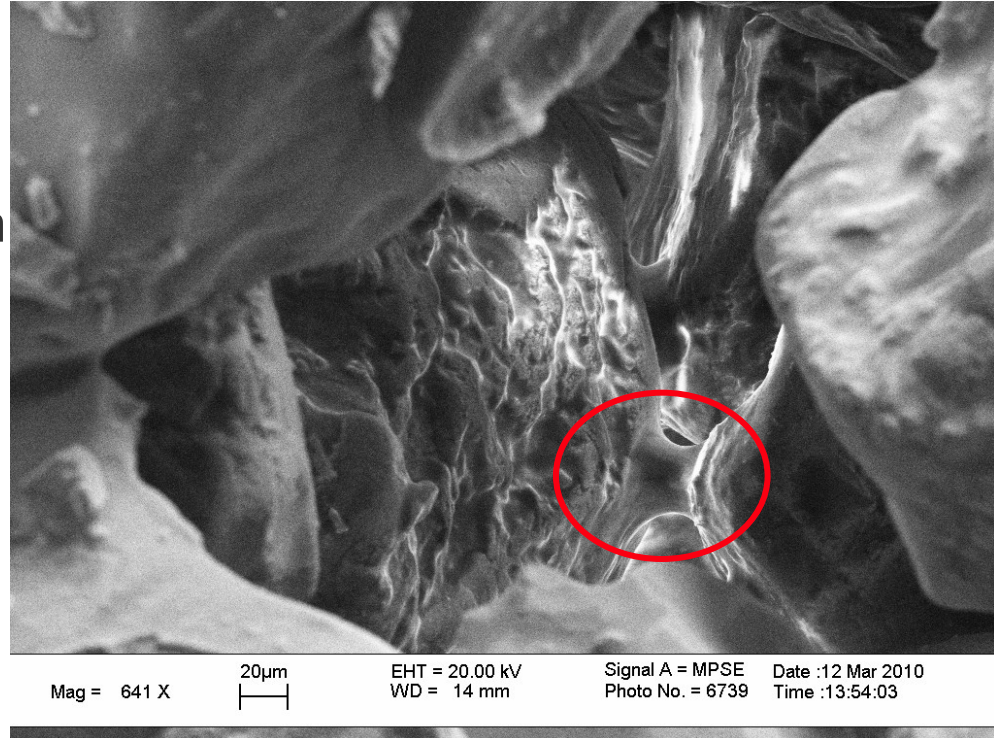


Eigenschaften

Wechselwirkung

Aerogel ↔ Binder

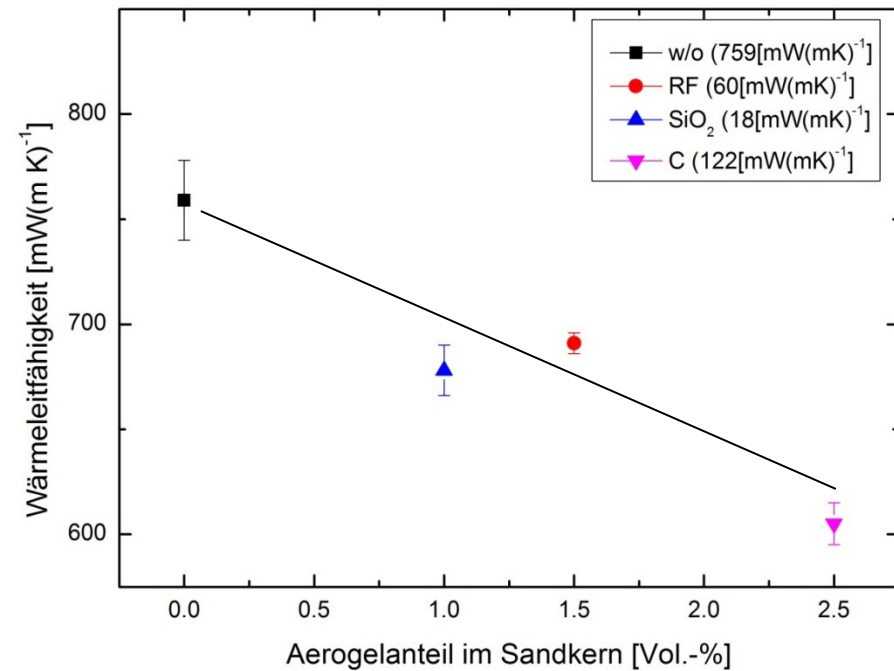
- Chemische Affinität, d.h. den thermischen Zersetzungsprodukten des eingesetzten Binders
- Adsorption und / oder Absorption von Gießgasen
- Reduktion der Gießgase
- Verzögerung des Gasstoß



Eigenschaften

Wärmeleitfähigkeit

Reduktion bei steigendem Aerogelanteil im Sandkern

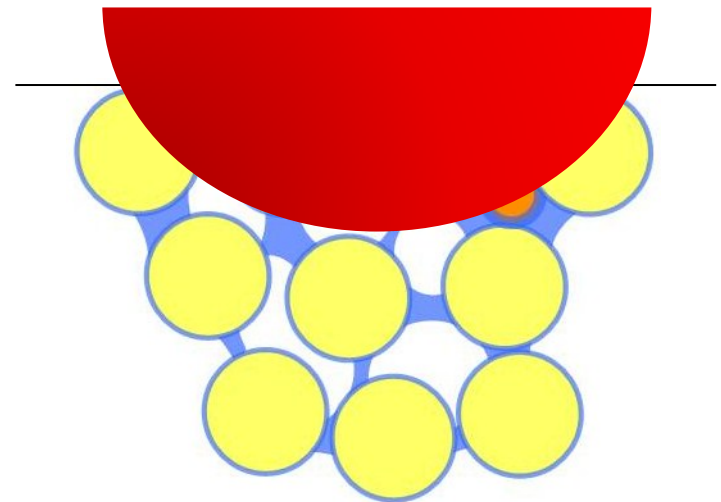


Eigenschaften

Auswirkungen auf den Sandkern

$$\lambda(\text{Sand} + \text{Binder}) > \lambda(\text{Sand} + \text{Aerogel} + \text{Binder})$$

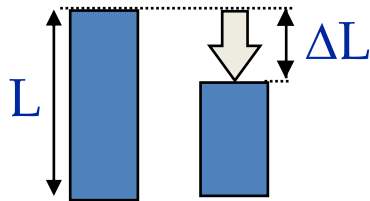
- Verzögerte Erstarrung der Metallschmelze
- Zersetzung des Binders an der Sandkernoberfläche
 - Angebrannter Sand
 - Penetration
- Reduktion der Gießtemperatur
- Dünnwandiges Gießen



Eigenschaften

E-Modul (E)

Druckspannung (σ)

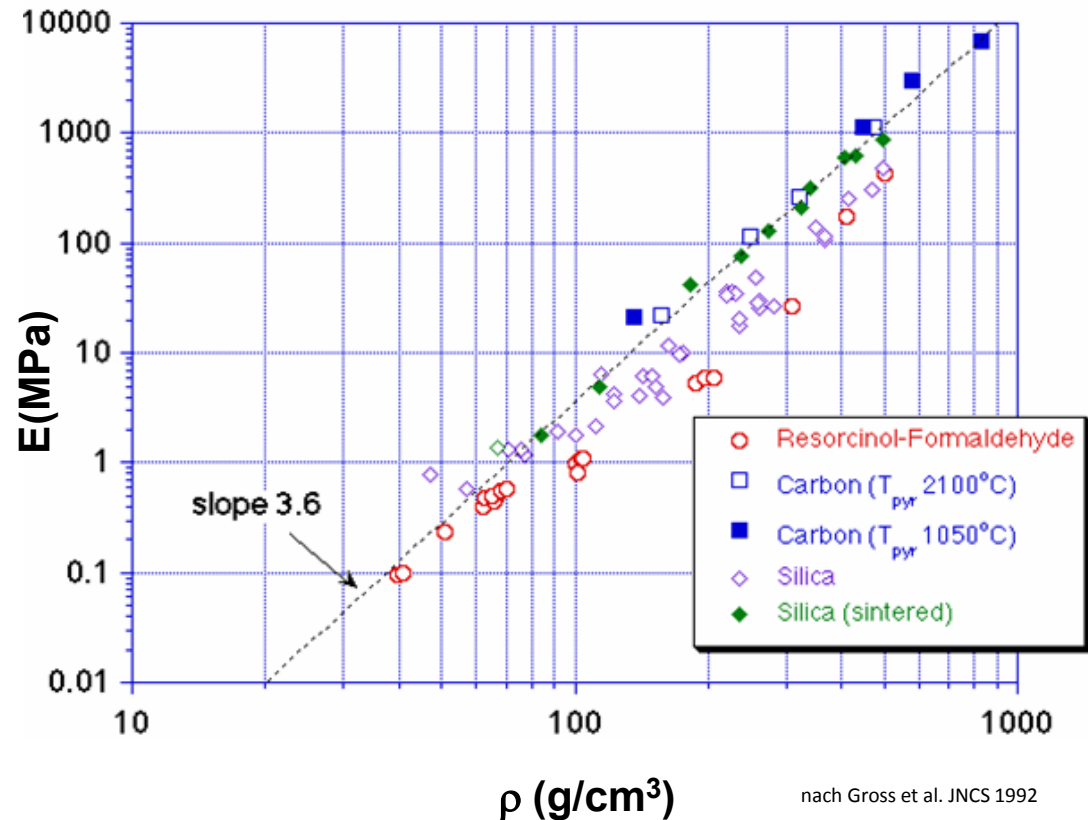


$$\sigma = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot E = \varepsilon \cdot E$$

Festigkeiten (Dichte)

Silica-Aerogel: 20 kPa bis 2 MPa

RF-Aerogele: 100 kPa bis 10 MPa



$$\sigma_B \propto \rho^{1.5}$$

$$E \propto \rho^{3.6}$$

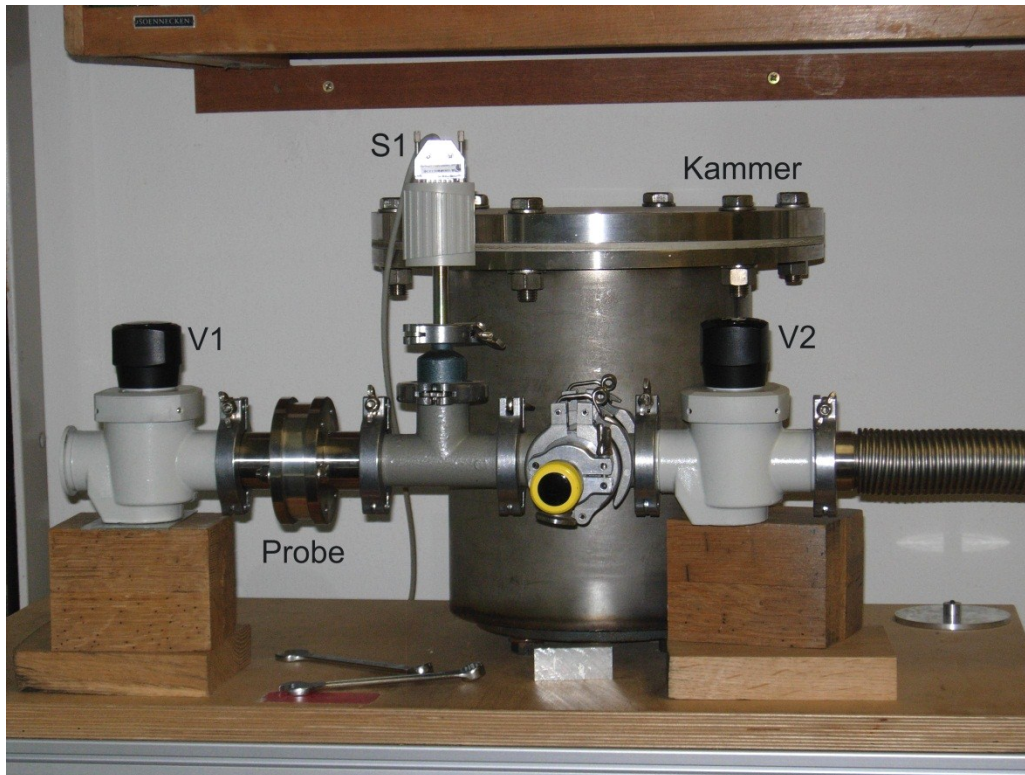


Eigenschaften

Gaspermeabilität

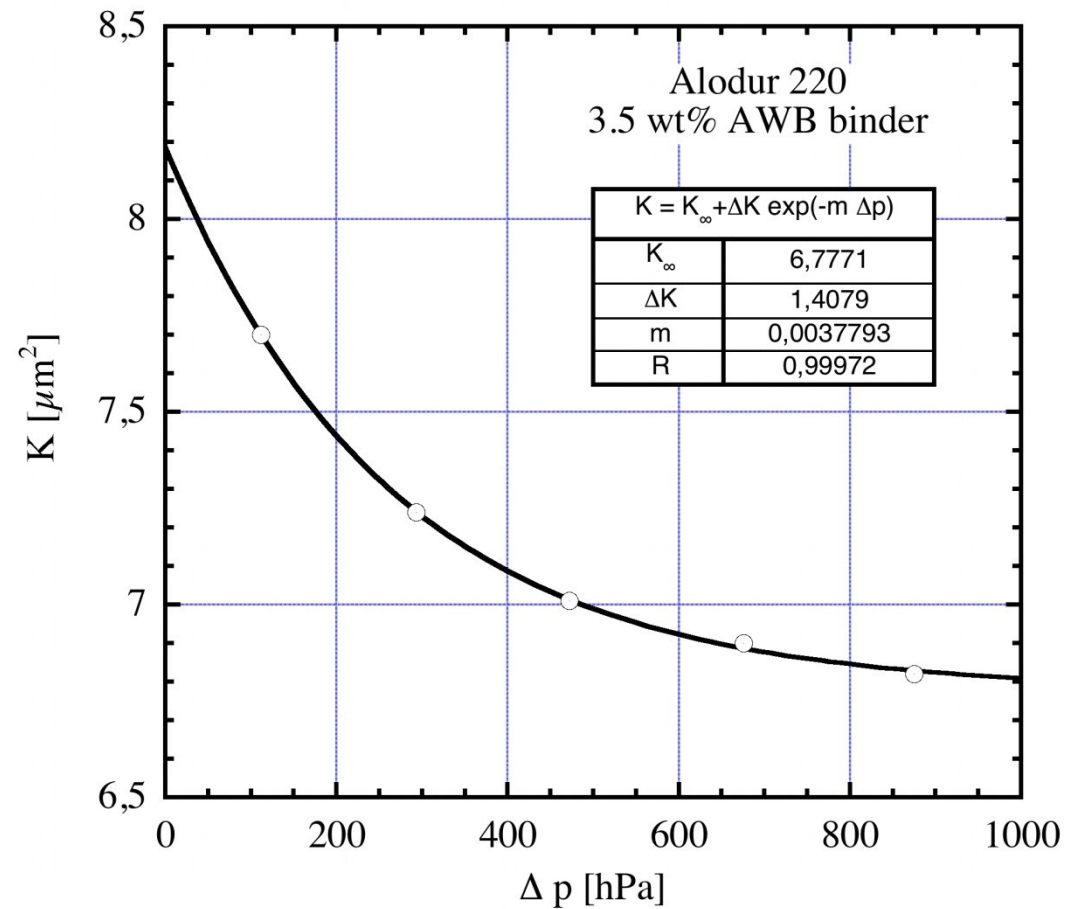
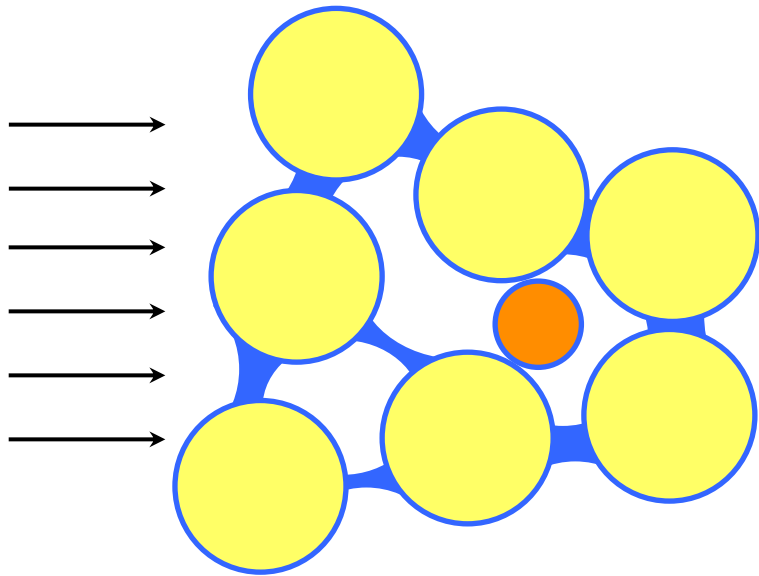
$$p_c(t) = p_0 \tanh \left(\frac{AKp_0}{2\mu h V_c} t + \operatorname{atanh} \left(\frac{p_c(0)}{p_0} \right) \right)$$

$$U = -K \frac{\Delta p}{h}$$



Eigenschaften

Gaspermeabilität



Gussfehler



Sanderosion,
Metallpenetration,
Angebrannter Sand

Anhaftungen und Einschluss von
Sandkörnern, Raue Oberflächen



Übersicht

1. Aerogele allgemein

Was sind Aerogele?

Wie werden Aerogele hergestellt?

Welche Eigenschaften haben Aerogele?

2. Aerogele in der Gießerei

Wo können Aerogele eingesetzt werden?

Welche Eigenschaften sind essentiell?

Einsatz in der Gießerei

Kernsandbinder - AeroSande

Kernsandadditive - AeroAdditive

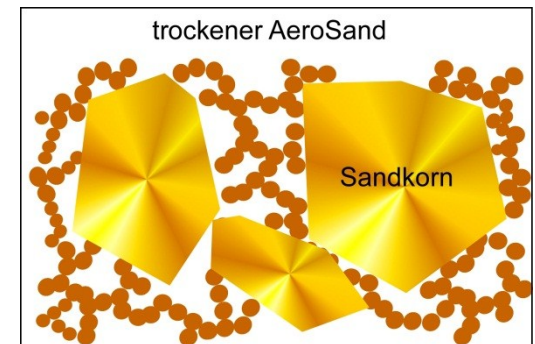
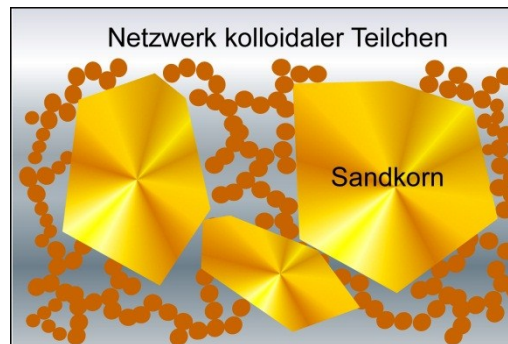
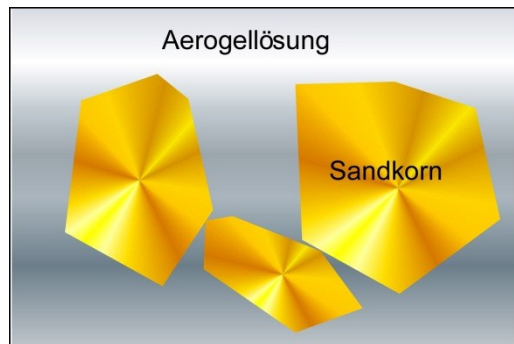
3. Nanotomographie



Kernsandbinder - **AeroSande**

Aerogel + Sand = AeroSand

- Gießereisande mit Polymer- oder Kohlenstoff-Aerogel als Binder
- Sandtypen
 - Korund, Zirkon, Cerabeads, Min-Sand, Quarz, Natursand, Bentonite, ...
- RF-Aerogel bzw. pyrolysiertes RF-Aerogel

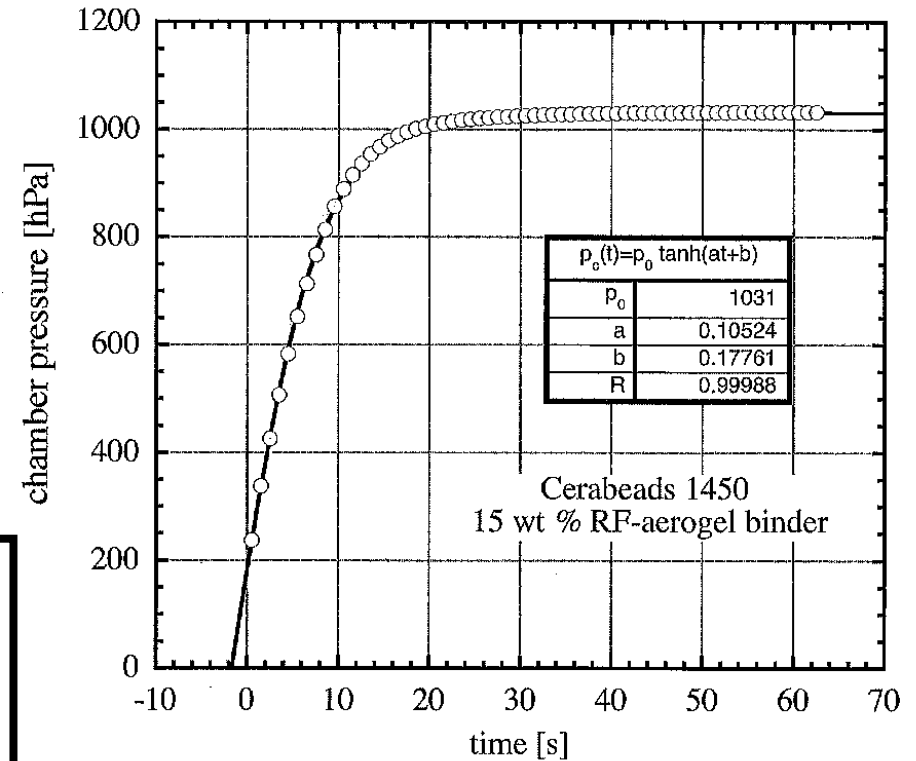
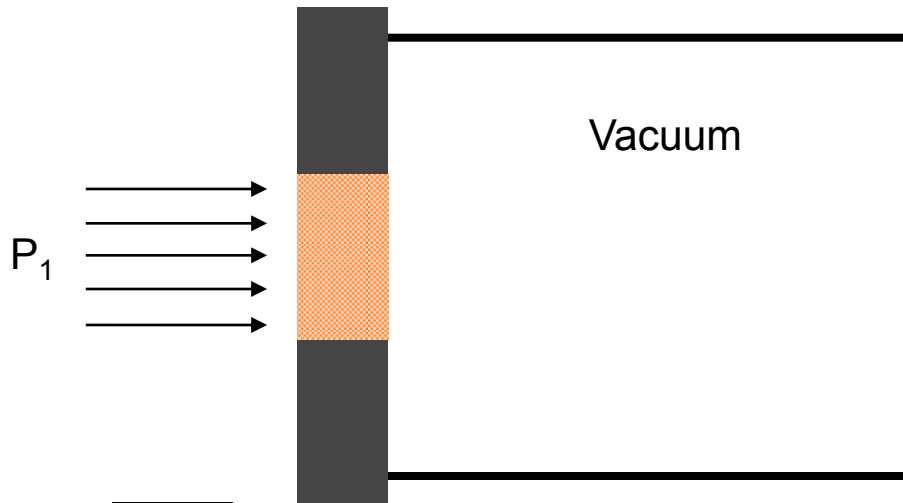


Technik:

Sol herstellen, Mischen mit Sand (ca. 10 Gew.-% Sol \approx 2 Gew.-% Binder);
Kernschießen (in eine Form schießen), unterkritisch trocknen; Fertig!

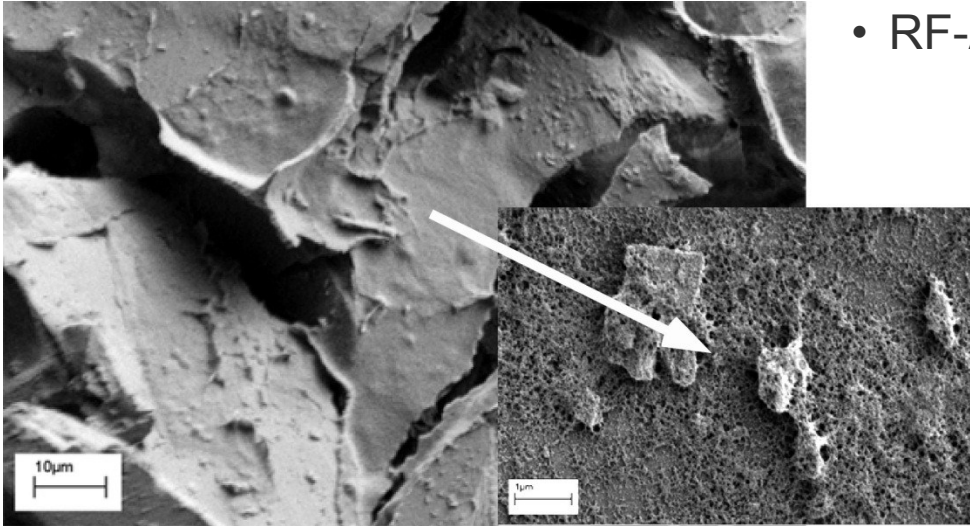


Gaspermeabilität der AeroSande

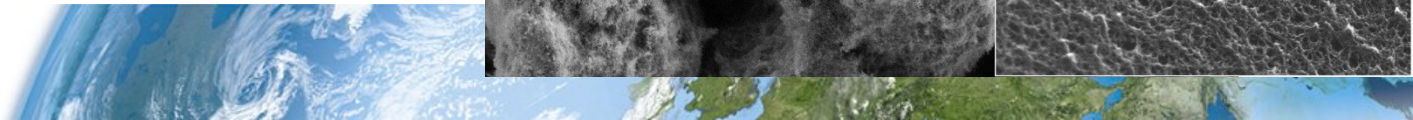
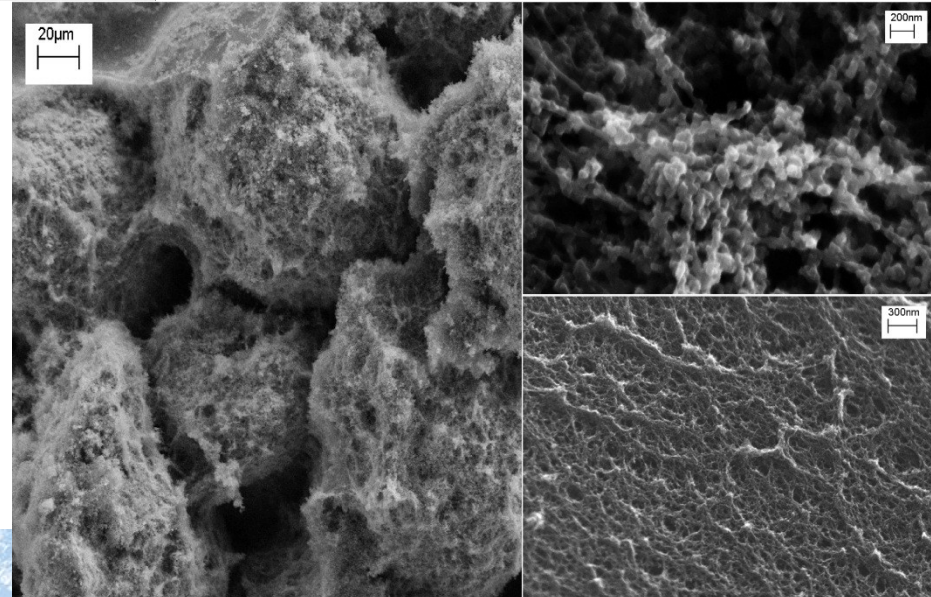


AeroSande - realer Aufbau

- RF-Aerogel mit Korundsand

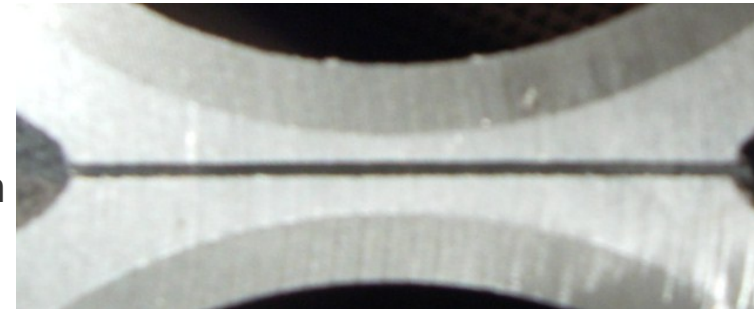


- Kohlenstoff-Aerogel mit Korundsand



AeroSande - Vorteile

- leichte Entkernung thermisch zersetzbar $> 350^{\circ}\text{C}$
- Wärmeleitfähigkeiten $0,1 - 2 \text{ W/Km}$
- gute Festigkeit $100 \text{ bis } 600 \text{ N/cm}^2$
- hohe Oberflächengüte
- keine messbare Schrumpfung
- exakte Maßhaltigkeit
- 100% rezyklierbarer Sand
- kein Gasstoß bei C-Aerosanden
- geringe Gasentwicklung bei RF-Aerosanden
- Lagerfähigkeit nicht feuchtigkeitsempfindlich



AeroSande - Nachteile

- Geringe Grünfestigkeit
- Eingeschränkte thermische Stabilität
- Lange Kerntrocknungszeiten
- Organischer Binder auf Basis von Resorcin-Formaldehyd



Eine geringfügige Zugabe von Bentoniten als Additiv zu den AeroSanden verbessert sowohl die Grünfestigkeit als auch die Temperaturstabilität der Kerne!



Übersicht

1. Aerogele allgemein

Was sind Aerogele?

Wie werden Aerogele hergestellt?

Welche Eigenschaften haben Aerogele?

2. Aerogele in der Gießerei

Wo können Aerogele eingesetzt werden?

Welche Eigenschaften sind essentiell?

Einsatz in der Gießerei

Kernsandbinder - AeroSande

Kernsandadditive - AeroAdditive

3. Nanotomographie



Kernsandadditiv - **AeroAdditive**



Kernsandadditiv - **AeroAdditive**

Idee: Aerogel-Granulate in Kernsande einbringen und Abgussqualität verbessern

Granulate aus

- Silika-Aerogel
- Polymer-Aerogel
- Kohlenstoff-Aerogel

Teilchengrößen:

- angepasst an Sandkorngröße
- Volumenanteil: bis zu 10 Vol.%

Binder:

- alle handelsüblichen, aber auch
- RF-Aerogelbinder (AeroSande)



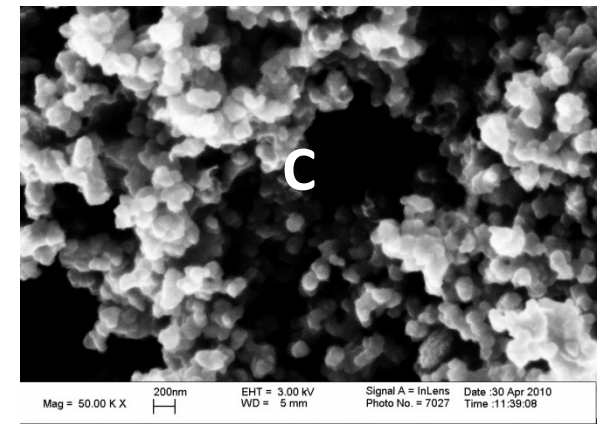
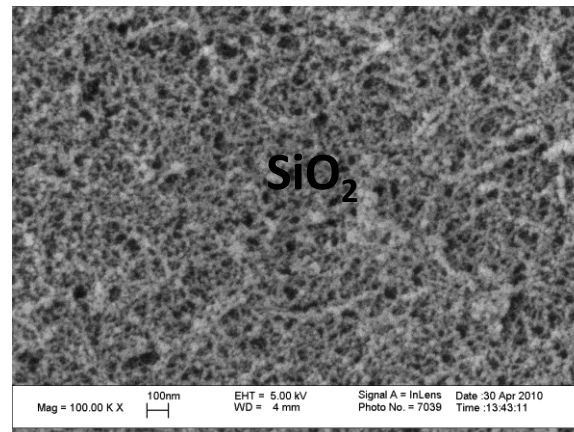
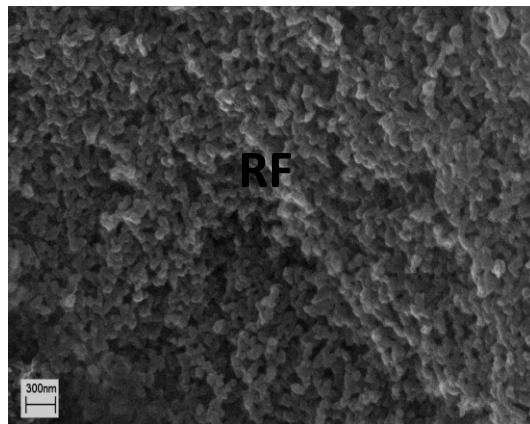
Einsatz von AeroAdditiven im Buntmetallguss



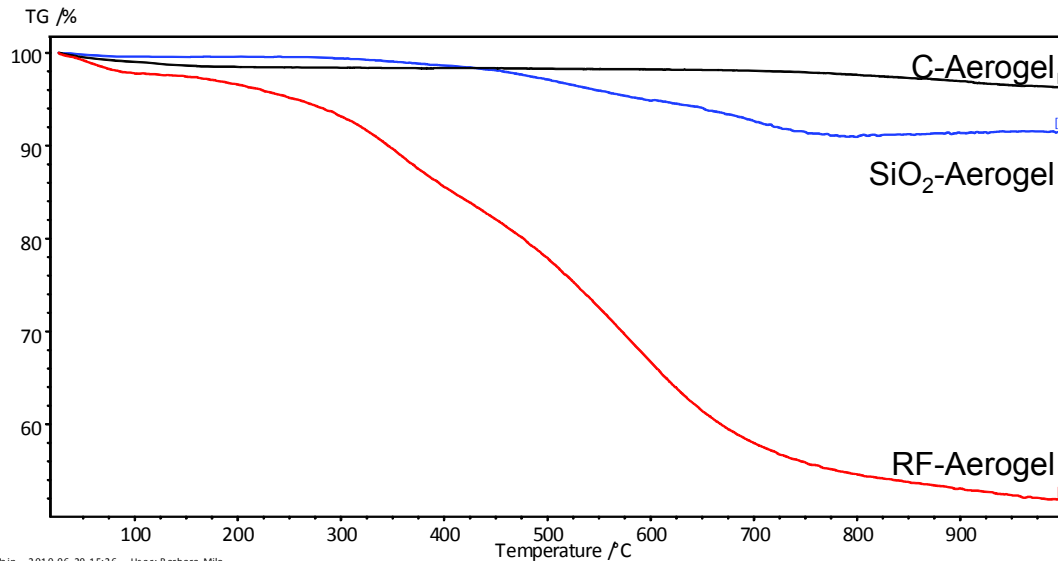
Charakterisierung der **AeroAdditive**



	RF	SiO ₂	C
Spezif. Oberflächen: $a_{s,BET}$ [m ² /g]	13	715	170
Porendurchmesser [nm]	50	20	1
Dichte [kg/m ³]	240-300	90-100	190-320
Wärmeleitfähigkeit [mW/(mK)]	60 ± 4	18	122 ± 1
Zersetzungstemperatur [°C]	272	854	584



Thermogravimetrische Untersuchungen der AeroAdditive



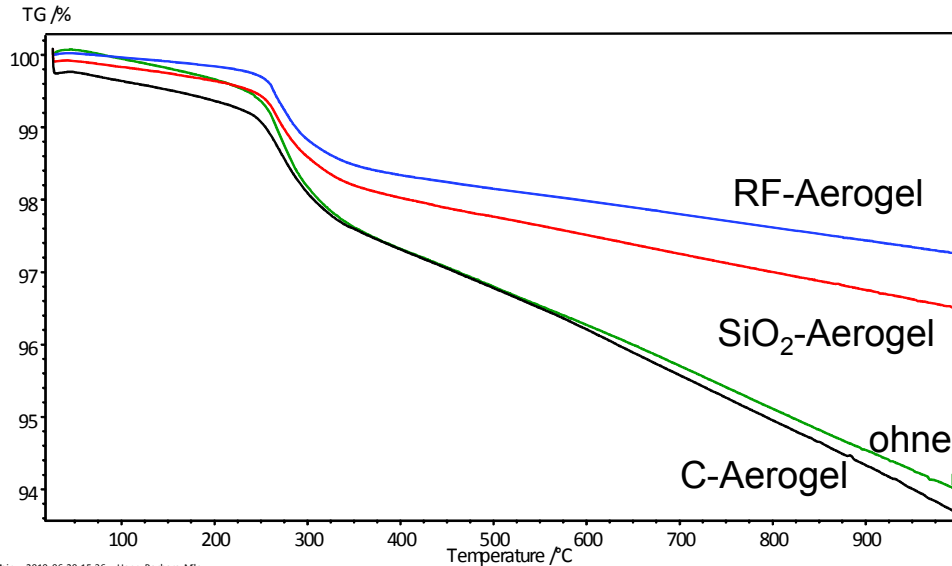
	Massenverlust [wt.-%]
SiO ₂ -Aerogel	8,5 ± 0.1
RF-Aerogel	35,2 ± 0.1
C-Aerogel	3,7 ± 0.1

- RF-Aerogel → vollständige thermische Zersetzung oberhalb 300°C
- SiO₂-Aerogel → geringe thermische Zersetzung
- C-Aerogel → unter nicht oxidativen Bedingungen bis 1000°C Zersetzung

FT-IR Analyse der TGA Zersetzungsgase: Wasser, CO/CO₂, Methan, kein BTX



Eigenschaften der Sandkerne



Sandkerne (Resin-Binder)	Massenverlust [wt.-%]
ohne Aerogel	6,0 ± 0,1
mit SiO ₂ -Aerogel (0,04 wt.-%)	3,5 ± 0,1
mit RF-Aerogel (0,16 wt.-%)	2,7 ± 0,1
mit C-Aerogel (0,21 wt.-%)	6,3 ± 0,1

RF-Aerogel und SiO₂-Aerogel



Verminderung des Massenverlust

C-Aerogel

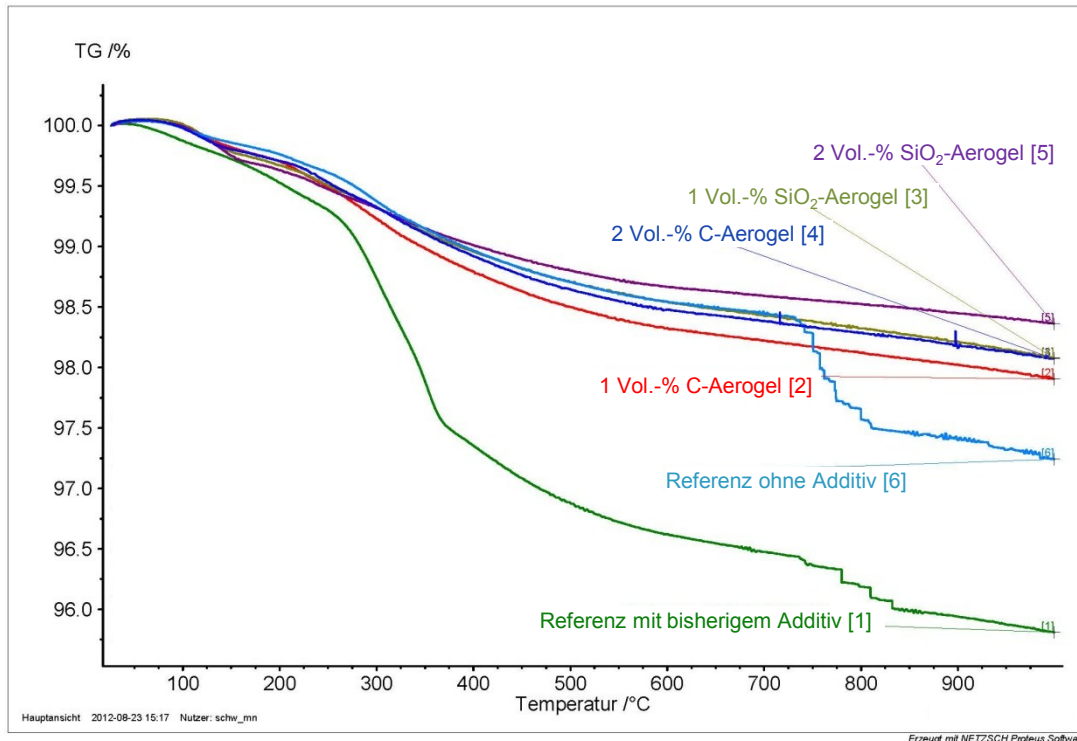


Massenverlust unbeeinflusst

FT-IR Analyse der TGA Zersetzungsgase: Wasser, CO/CO₂, Methan, kein BTX



Eigenschaften der Sandkerne



Sandkerne (Cold-Box-Binder)	Massen- verlust [wt.-%]
ohne Additiv	$2,7 \pm 0,1$
bisheriges Additiv	$4,2 \pm 0,1$
SiO_2 -Aerogel (1 Vol.-%)	$1,9 \pm 0,1$
SiO_2 -Aerogel (2 Vol.-%)	$1,6 \pm 0,1$
C-Aerogel (1 Vol.-%)	$2,1 \pm 0,1$
C-Aerogel (2 Vol.-%)	$1,9 \pm 0,1$

C-Aerogel und SiO_2 -Aerogel



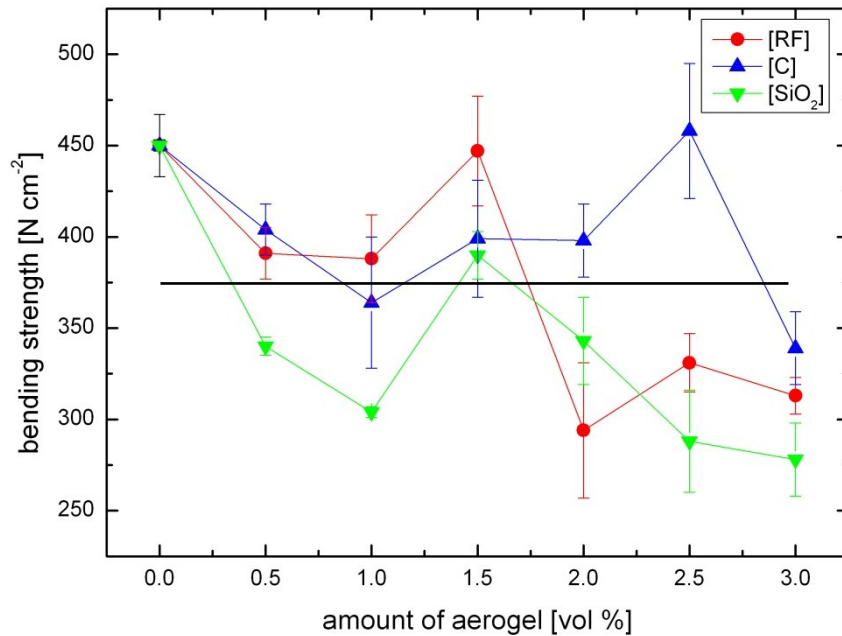
Verminderung des Massenverlust

FT-IR Analyse der TGA Zersetzungsgase: Wasser, CO/CO_2 , Methan, kein BTX

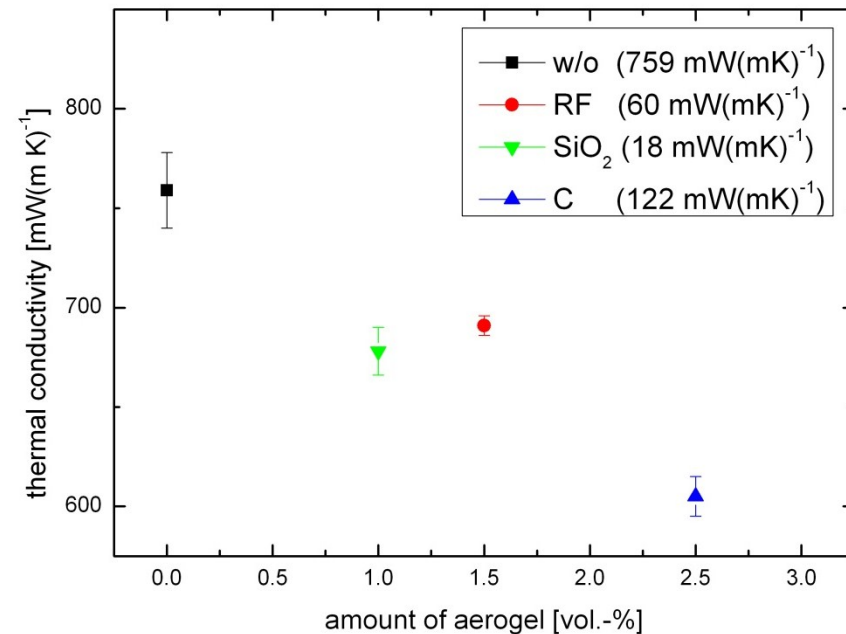


Eigenschaften der Sandkerne

Mechanische Eigenschaften

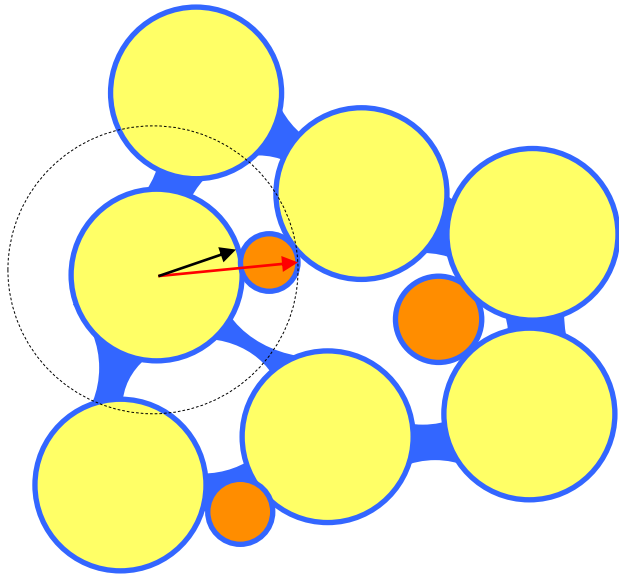


Wärmeleitfähigkeit

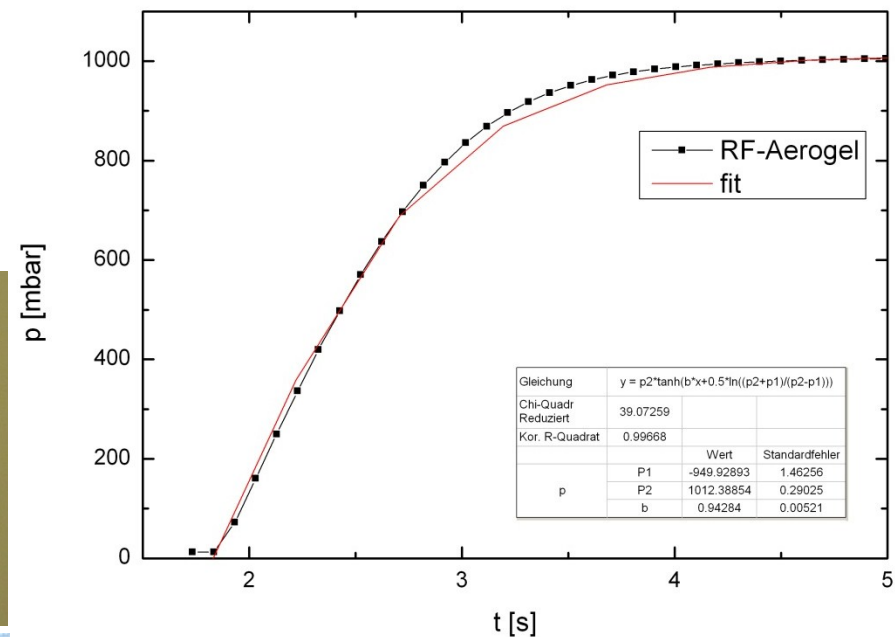


Eigenschaften

Gaspermeabilität



Sandkerne (Resin-Binder)	K [μm^2]
ohne Aerogel	70
SiO ₂ -Aerogel (1,0 vol.-%)	105
RF-Aerogel (1,5 vol.-%)	106
C-Aerogel (2,5 vol.-%)	97



Gasstoß während des Abgussprozess

Aerogeltyp	Anteil Aerogel [Vol.-%]	Aluminiumguss Zeit bis zum Gasstoß [s]	Messingguss Zeit bis zum Gasstoß [s]
ohne	0	11,5	32
SiO ₂	1,0	16	
RF	1,5	17,5	
C	2,5	18	50,5

Verzögerung des Gasstoß um 50%



Gussteilqualität



ohne AeroAdditive

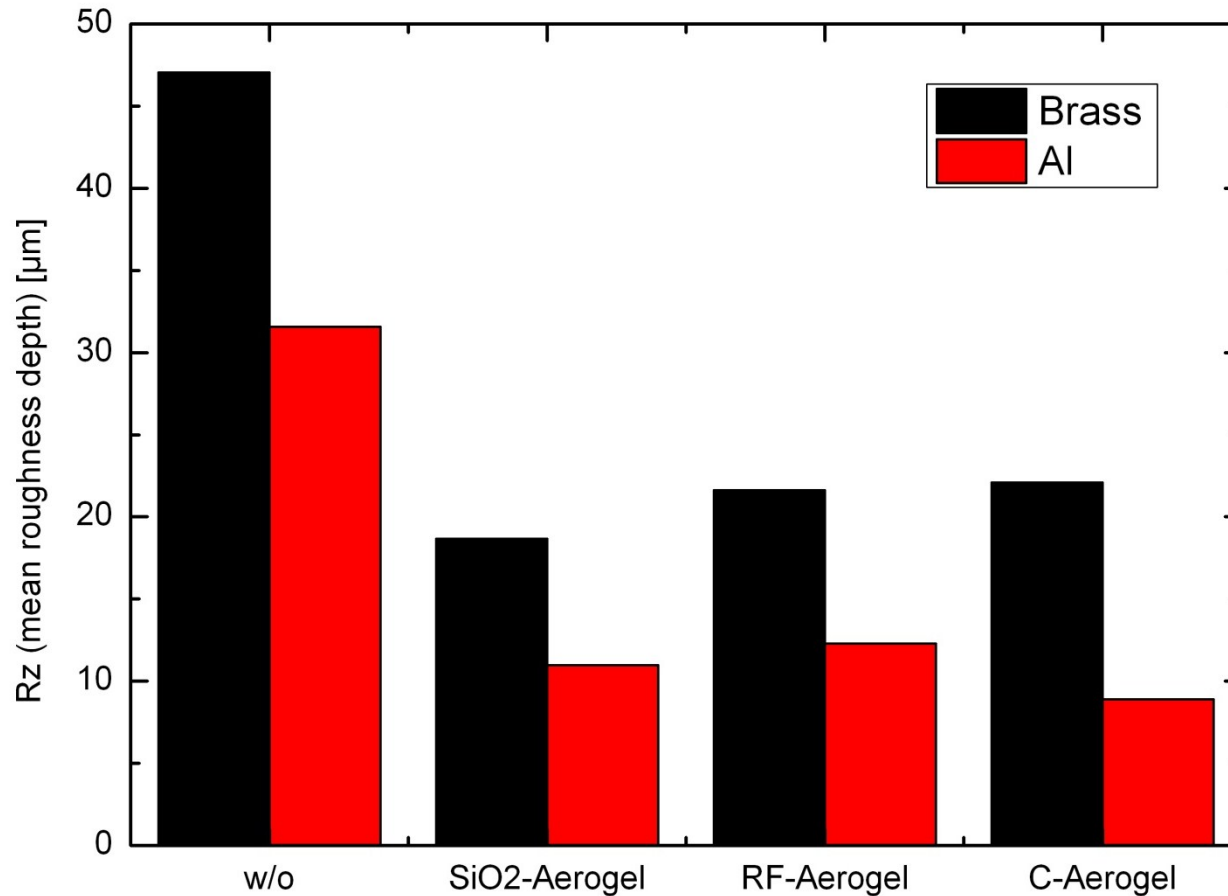


mit 1,5 vol.-% RF-Aerogel

Reduktion der Sandanhaftungen



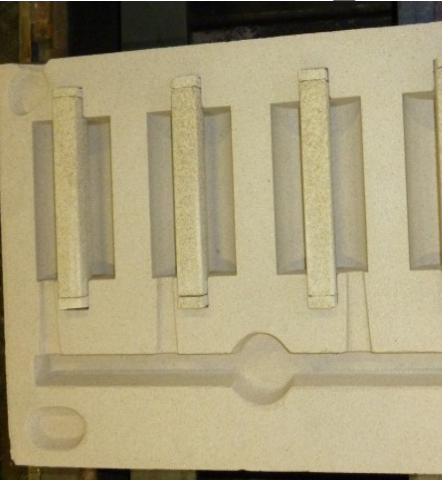
Oberflächenrauigkeit der Gussteiloberflächen



Reduktion der Rauigkeit um 50%

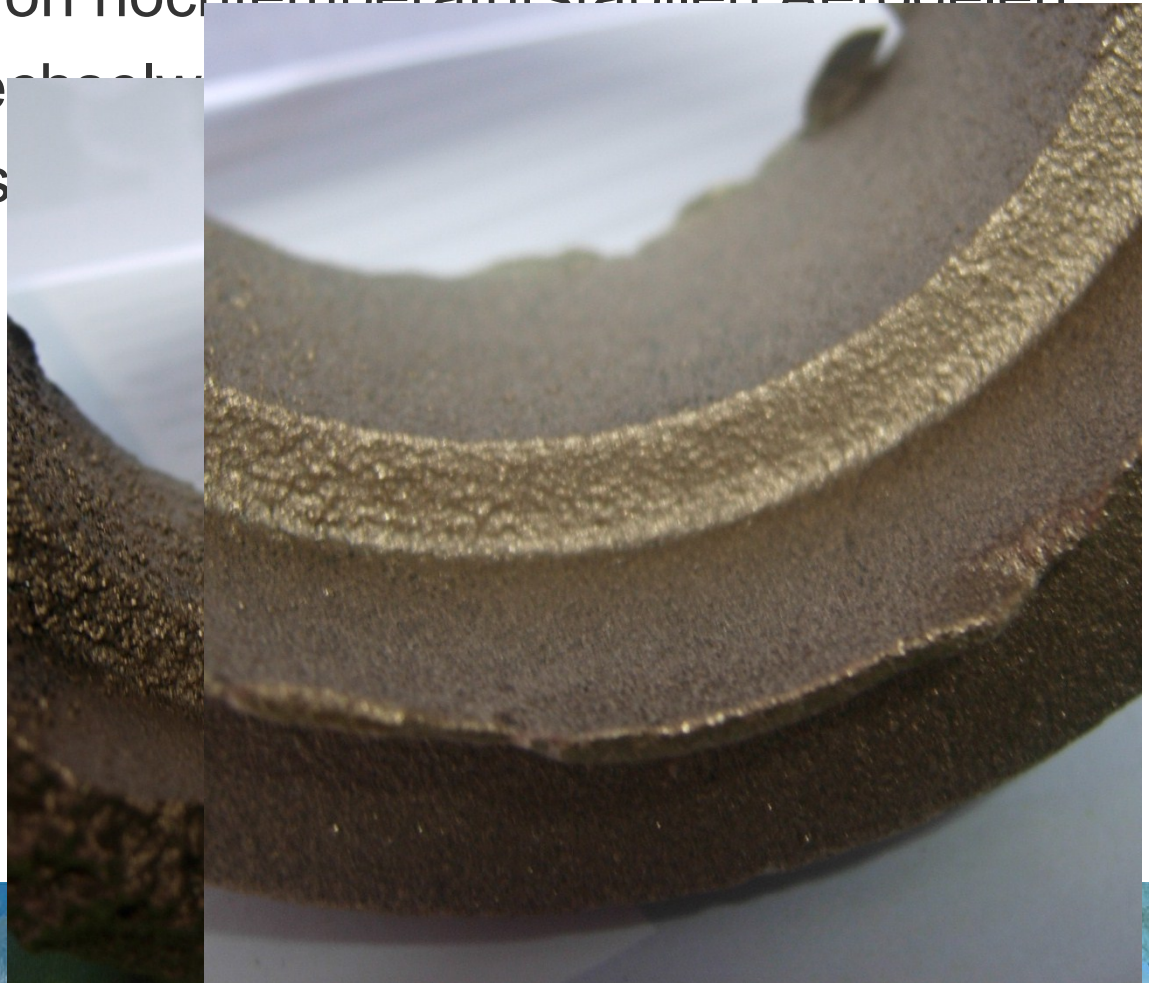


Abguss (Grauguss, $T_{\text{Schmelze}} = 1400^{\circ}\text{C}$)



Herausforderungen

- Entwicklung von hochtemperaturstabilen Aerogelen
- individuell Weichstruktur
- Nicht alle Gase



Übersicht

1. Aerogele allgemein

Was sind Aerogele?

Wie werden Aerogele hergestellt?

Welche Eigenschaften haben Aerogele?

2. Aerogele in der Gießerei

Wo können Aerogele eingesetzt werden?

Welche Eigenschaften sind essentiell?

Einsatz in der Gießerei

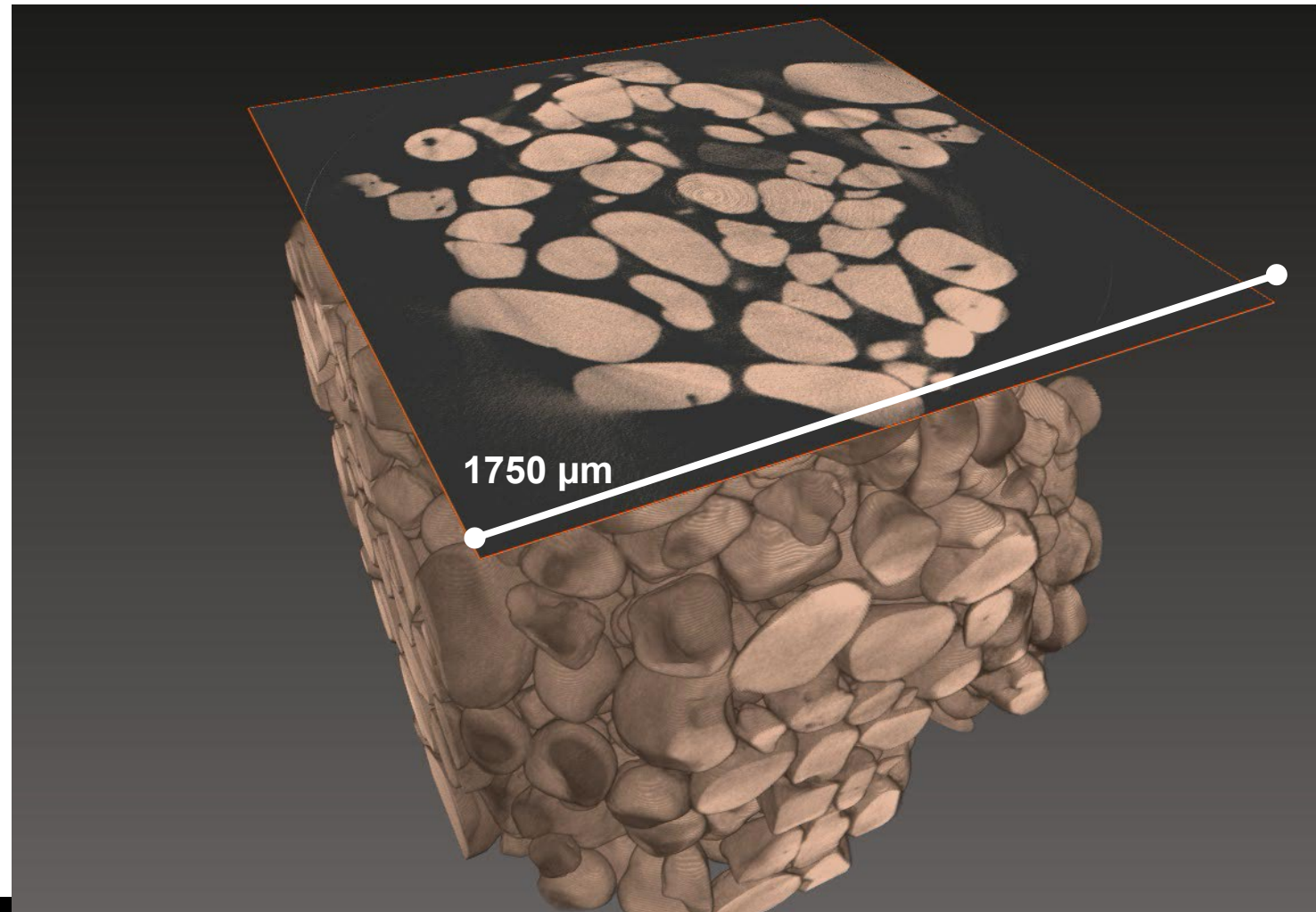
Kernsandbinder - **AeroSande**

Kernsandadditive - **AeroAdditive**

3. Nanotomographie

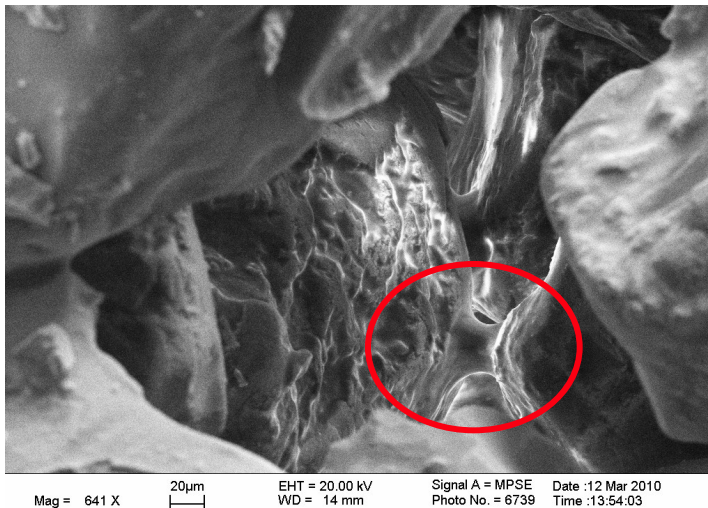
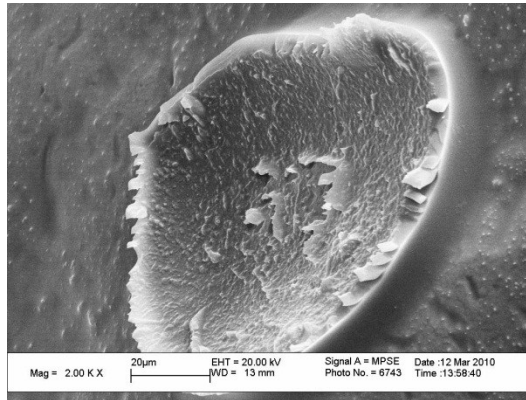


Nanotomographie

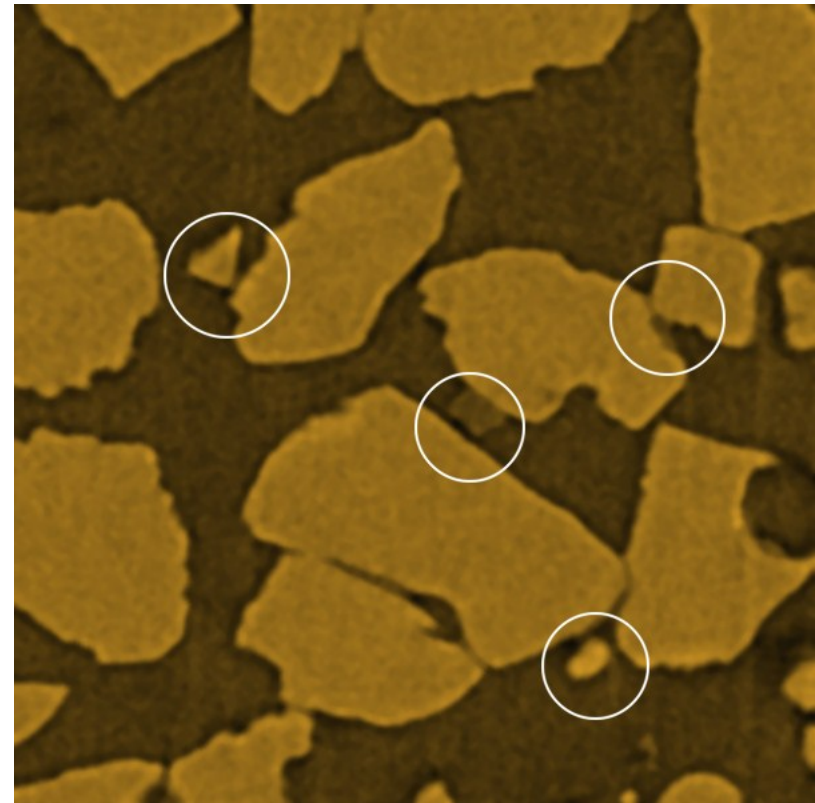


Charakterisierung von Binderbrücken

SEM



3D-Nanotom



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

